

Содержание щелочных оксидов в стеклах с наибольшей водоустойчивостью, которая соответствует 4 гидролитическому классу, является следующим (мол. %): Li_2O 9 – 14, Na_2O 14 – 18 и K_2O 2 – 6.

Учитывая, что эти стекла характеризуются достаточно высокими значениями теплового расширения ($\text{ТКЛР} > 145 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$) и электроизоляционных свойств то можно заключить, что указанное соотношение между содержанием щелочных оксидов является наиболее предпочтительным для электроизоляционных эмалевых покрытий по алюминию.

Список литературы: 1. Эмалирование металлических изделий : [под общ. ред. Варгина В.]. – [2-е изд.]. – Л. : Машиностроение, 1972. – 496 с. 2. Технология эмали и защитных покрытий / [Брагина Л. Л., Зубехин А. П., Белый Я. И. и др.] ; под ред. Л. Л. Брагиной, А. П. Зубехина. – Харьков : НТУ “ХПИ”; Новочеркасск : ЮРГТУ (НТИ), 2003. – 484 с. 3. Химическая технология стекла и ситаллов / [Артамонова М. В., Асланова М. С., Бужинский И. М. и др.] ; под ред. Н. М. Павлушкина. – М. : Стройиздат, 1983. – 432 с. 4. Мазурин О. В. Электрические свойства стекла / Мазурин О. В. – Л. : Ленгосхимиздат, 1962. – 162 с.

Поступила в редколлегию 05.06.09

УДК 621.926

А.В. АНЦИФЕРОВ, канд. техн. наук,
Национальный горный университет, Днепропетровск

УДАРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТЕЛ ПРИ НАЛИЧИИ ПОРОШКОВОГО СЛОЯ

Досліджується віброударна система, що моделює процес руйнування шару матеріалу у вертикальному вібраційному млині. У теоретичній частині роботи пропонується використовувати методи теорії пружності для вирішення контактних задач. Проведено експеримент за визначенням радіусу плями контакту, що формується кулею при ударі по площині через шар порошку.

The research of the vibroimpact system, modeling the process of material layer destruction in a vertical vibration mill, is conducted. In theoretical part of work it is suggested to utilize the methods of theory of resiliency for the decision of contact tasks. An experiment is conducted on determination contact radius of spot, formed a ball at a blow to the plane through the layer of powder.

При измельчении материалов используются различные типы оборудования, в том числе и вертикальные вибрационные мельницы (МВВ). В основу их работы положена оригинальная идея придания помольной камере прямолинейной траектории колебаний в вертикальной плоскости. Таким образом реализуется виброударный способ нагружения, который обеспечивает высокую степень измельчения хрупких материалов и одновременную активацию их за счет проведения механохимических реакций. К технологическим параметрам процесса измельчения в МВВ относятся амплитуда и частота колебаний помольной камеры, форма, размеры и количество мелющих тел (обычно это шары), а также масса измельчаемого материала.

Технологическая загрузка в виде шаров заполняет камеру до определенного уровня. Ее можно рассматривать как единичную массу с кусочно-линейными упругими и диссипативными связями [1]. Такой подход позволяет составить уравнения динамики системы и по результатам решения определить нагрузки в элементах конструкции.

Важным параметром помольной камеры МВВ есть зазор между верхним слоем шаров и крышкой когда камера неподвижна. Правильно выбранная величина обеспечивает взаимодействие технологической загрузки с камерой в виброударном режиме, при котором процессы измельчения и механоактивации частиц проходят наиболее эффективно. В работе [2] рассматривается подход к расчету технологических параметров МВВ с позиций виброударных систем. При этом вводятся допущения о пренебрежении временем ударного взаимодействия и отсутствии промежуточного порошкового слоя между шаром и камерой. Но данный подход при построении динамической модели МВВ будет, по-видимому, достаточно грубым. Количество загружаемого в помольную камеру МВВ материала образует слой, соизмеримый с размером мелющего тела. Вибрационное перемещение камеры в вертикальном направлении создает условия для перехода находящегося в ней материала в состояние виброкипящего слоя. При этом плотность материала в слое неравномерна – максимальная в нижней части и убывающая по высоте.

Таким образом, ударное взаимодействие технологической загрузки с днищем происходит через слой порошкового материала. Учет времени взаимодействия тел при расчете виброударной системы приводится в [3]. Здесь надо отметить работу [4], в которой также предлагается учет времени взаимодействия элементов виброударной системы. Но выбранный автором подход можно охарактеризовать как математический, не позволяющий учесть

характеристики взаимодействующих тел.

Целью данной работы является создание физической и математической моделей ударного взаимодействия двух тел через слой порошка и разработка метода решения данной задачи.

Физическая модель. Рассмотрим единичный удар шара по плоскости с промежуточным порошковым слоем.

Пусть в статическом состоянии слой материала в камере имеет толщину h_0 . При наложении на слой порошка вертикального вибрационного воздействия величиной $\Gamma = a w^2/g$ он переходит в состояние виброоживления, а затем при $\Gamma > 1$ в виброкипящее состояние с толщиной слоя

$$h_v = K(\Gamma) h_0, \quad (1)$$

где $K(\Gamma)$ – коэффициент пропорциональности.

В формуле (1) величина h_v обозначает высоту свободного слоя без учета наличия шара, совершающего виброударное движение внутри камеры.

Состояние материала позволяет допустить, что шар не испытывает сопротивления, либо оно достаточно мало и им можно пренебречь, на определенной части пути его движения сквозь виброкипящий слой. Но с определенного момента времени шар при движении к днищу камеры «захватывает»

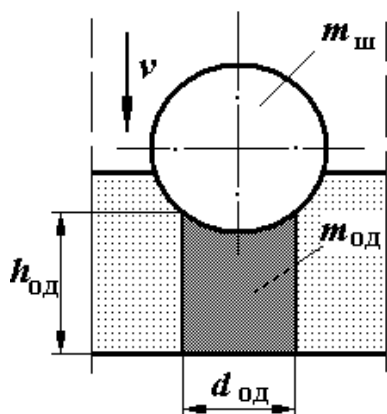


Рис. 1. Физическая модель формирования ОД

определенную часть материала (рис. 1), из которого формируется объем деформирования (ОД), а входящие в него частицы будут разрушены. Считаем, что ОД имеет форму цилиндра с диаметром основания $d_{од}$ и высотой $h_{од}$.

По нашей модели величина $h_{од}$ связана с высотой слоя в (1) функциональной зависимостью $h_{од} = f(h_v)$, причем зависимость является обратнопропорциональной. Чем более сильное состояние виброкипания, тем меньше материала «захватится» шаром в объем деформирования.

Математическая модель. Скорость взаимодействия шара с порошком и далее с дном камеры относительно низкая. Физическая природа элементов системы позволяет считать, что волновые явления в процессе удара отсутствуют. Поэтому подойдем к решению задачи с энергетических позиций. Рас-

смотрим два этапа взаимодействия шара с основанием через слой порошка и на которые будет расходована кинетическая энергия шара:

1. Преодоление сопротивления порошка до момента начала упругих деформаций в частицах на линии удара – этап уплотнения и формирования $h_{\text{од}}$ (рис. 1).

2. Вдавливание шара в слой порошка – этап формирования $a_{\text{од}}$ и разрушения частиц, вошедших в ОД.

Рассмотрим первый этап преодоления сопротивления порошка с позиций статики, применив теорию вдавливания тела в грунт. Сопротивление слоя порошка движению шара определяется из выражения

$$q = q_0 h, \quad (2)$$

где q – фактическое давление; q_0 – характеристическая величина для каждого материала и соответственно для формы уплотняющего тела, соответствующая давлению, при котором происходит заглубление тела на единицу длины; h – глубина погружения уплотняющей поверхности.

Работа, затраченная на уплотнение порошка поверхностью шара площадью F , считая закон нарастания сопротивления линейным, определится из выражения

$$A_{\text{упл}} = 0,5 q h F. \quad (3)$$

Еще раз подчеркнем, что (3) определяет работу на формирование высоты ОД, но не на разрушение частиц, входящих в этот объем. Другими словами это потеря энергии шара на уплотнение им слоя порошка до начала деформаций и последующего разрушения частиц. Теперь перейдем к анализу второго этапа – вдавливание шара и разрушения частиц материала в ОД. Воспользуемся разделом теории упругости для контактных задач. Считаем слой порошка после уплотнения упругим слоем. Из [5] при действии нормальной сосредоточенной силы Q на упругое полупространство деформации по линии действия силы

$$u(z, r) = \frac{1+m}{2p E} Q \left[z^2 (z^2 + r^2)^{-3/2} + 2(1-m) (z^2 + r^2)^{-1/2} - \right. \\ \left. - h^2 (h^2 + r^2)^{-3/2} - 2(1-m) (h^2 + r^2)^{-1/2} \right], \quad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона; z – координата, нормальная к поверхности полупространства и направленная в его глубь; r – радиальная координата, расположенная в плоскости, параллельной плоскости полупространства; h – толщина упругого слоя (в нашем случае $h = h_{\text{од}}$).

Если в упругий слой вдавливаются сфера радиуса R (рис. 2), то нагрузка на тело распределена по некоторому закону $Q = Q(r)$, а максимальное перемещение в центре определится из выражения

$$u(z) = \int_0^a \int_0^{2p} Q(r) u(z, r) r dr. \quad (5)$$

Распределенную нагрузку $Q(r)$ можно привести к эквивалентной сосредоточенной силе N , используя функцию Герца

$$Q(r) = \frac{3}{2} \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}} \frac{N}{p r^2}. \quad (6)$$

Деформация поверхности упругого слоя $u(z, r)$ в центре приложения нагрузки определяется как $u(z, r) \big|_{z=0} = z(a)$. Из (4) при $z = 0$ и после подстановки в (5) с учетом (6) получим

$$z(a) = \frac{9N}{8p E a} \left[\frac{p}{2} - \frac{h^2}{a \sqrt{a^2 + h^2}} + \frac{h^2 - a^2}{a^2} \arcsin \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right]. \quad (7)$$

Связь между глубиной вдавливания $z(a)$ и радиусом пятна контакта a (рис. 2) с учетом того, что форма отпечатка в виде сферического сегмента имеет радиус шара, описывается выражением

$$z(a) = R - \sqrt{R^2 - a^2}. \quad (8)$$

После подстановки (7) в (8) и преобразований получим

$$N = \frac{8p E}{9} f(a), \quad (9)$$

где
$$f(a) = a \left(R - \sqrt{R^2 - a^2} \right) \left[\frac{p}{2} - \frac{h^2}{a \sqrt{a^2 + h^2}} + \frac{h^2 - a^2}{a^2} \arcsin \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} \right]^{-1}.$$

Энергия деформации упругого слоя от вдавливания в него шара равна работе сосредоточенной силы N на пути $z(a)$. Аналогично (3) получим

$$A_{вд} = 0,5 N z(a). \quad (10)$$

Кинетическая энергия шара для конкретного радиуса шара и параметров колебаний камеры является известной. Она затрачивается на два вида работ (3) и (10). Следующими задачами является определение радиуса пятна контакта a (рис. 2) и оценка распределения энергий между этими работами.

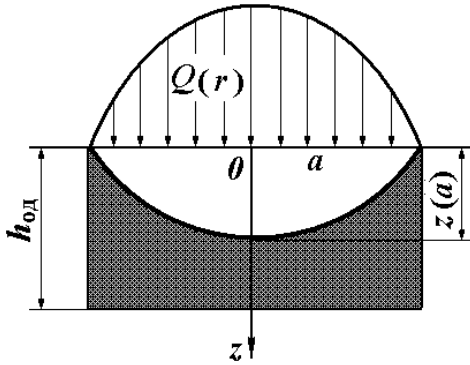


Рис. 2. Расчетная схема вдавливания шара в ОД

Остановимся на первой задаче. В первом приближении величину a можно определить из [6] по методике нахождения угла захвата щековых дробилок. Для коэффициента трения частиц металла по поверхности стального шара $f = 0,1$ принимаем из условия для угла захвата $\alpha \leq 2 \arctg f$ значение $\alpha = 0,15$. Отсюда в зависимости от радиуса шара R получим

$$a = R \sin \alpha. \quad (11)$$

С другой стороны из [7] радиус площадки контакта при взаимодействии шара и пластины определяется более сложной формулой, но с учетом многих параметров, влияющих на ударное взаимодействие

$$a = \sqrt{R} \left(\frac{5v^2}{4Mn} \right)^{1/5}, \quad (12)$$

где R – радиус ударника; v – скорость удара; $M = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}$ – приведенная

масса; $n = \frac{4 \sqrt{R}}{3p (k_1 + k_2)}$; $k_1 = \frac{(1-m_1)}{p E_1}$; $k_2 = \frac{(1-m_2)}{p E_2}$.

Для проверки точности формул (11) и (12) был проведен эксперимент.

Целью его было измерение пятна контакта из сыпучей среды между плоской поверхностью и ударяющим по ней шаром. Именно это пятно при дальнейшем вдавливании в него шара является той областью, в которой происходит основной в вибромельнице процесс – измельчение. Знание парамет-

ров объема деформирования, прежде всего его радиуса, высоты и соответственно массы, необходимо для выбора рациональных параметров работы вибромельницы. До настоящего времени эксперименты по определению объема деформирования не проводились.

Для решения поставленной задачи был предложен способ, учитывающий эффект «локализации» порошка при ударе шара. Это хорошо видно на фотографиях (рис. 3, а).

Этот эффект проявляется в определенной фиксации порошка в виде пятна при ударе и отскоке шара. Порошок вокруг зоны деформирования разбрасывается в стороны, образуя пустую кольцеобразную площадку (рис. 3, б).

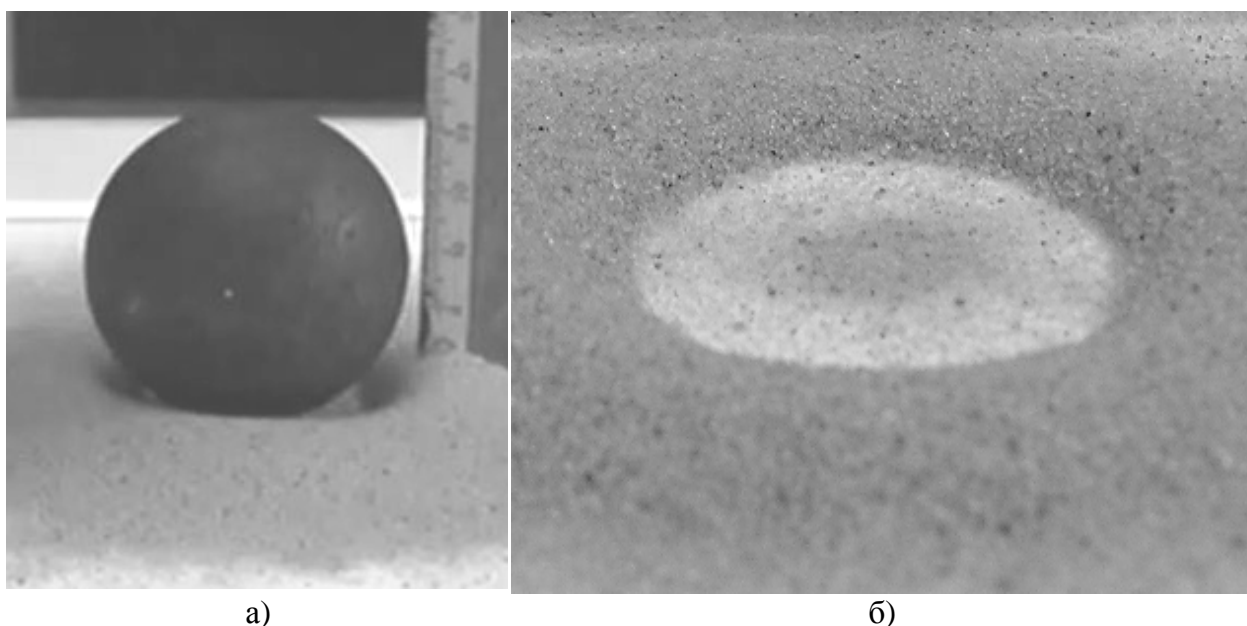


Рис. 3. Падение шара на слой сыпучего материала

Экспериментальные исследования по определению пятна контакта при падении шара на слой порошка проводились на установке, конструктивная схема которой позволяла снимать на цифровую камеру через зеркало снизу плоскость контакта шара со слоем порошка. Слой порошка заданной толщины располагался на пластине из оргстекла. Скорость соударения задавалась высотой падения шара. Порошковым материалом был металлический сплав. Площадь пятна оценивались по нескольким характерным размерам в плане с помощью наклеенных на оргстекло полос из миллиметровой бумаги. Мелкие пятна фиксировались аэрозолем и изучались под микроскопом (рис. 4).

Результаты расчетов радиуса площадки контакта по формулам (11), (12) и экспериментальные данные показаны на рис. 5.

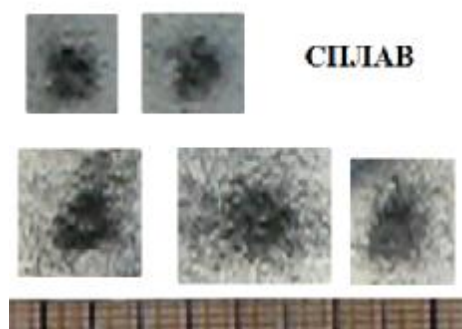


Рис. 4. Пятна контакта

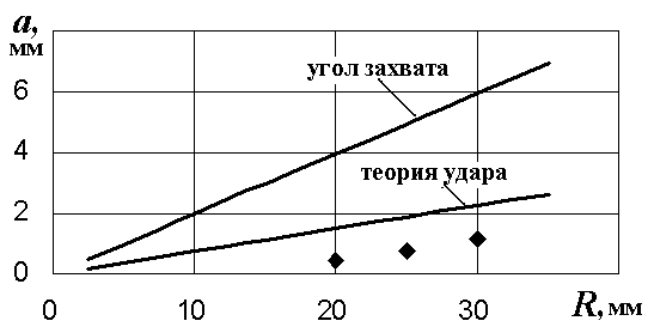


Рис. 5. Сравнение опытных и расчетных данных

Выводы. Использование методов решения контактных задач теории упругости позволяет свести рассмотрение процесса соударения тел через порошковый слой к энергетической постановке: сумма работ на уплотнение слоя и вдавливание ударника в объем деформирования.

Радиус пятна контакта с погрешностью до 30 % определяется из зависимостей теории удара. Метод расчета пятна контакта по углу захвата в теории дробления дает погрешность в несколько раз больше.

Список литературы: 1. Франчук В.П. Конструкция и динамический расчет вибрационных мельниц / В.П. Франчук. // Техника и технология обогащения руд. – М.: Недра, 1995. – С. 143 – 160. 2. Анциферов А.В. Симметричная двухмассная модель помольной камеры MBV / А.В. Анциферов. // Вибрации в технике и технологиях. – 1998. – № 4 (8). – С. 55 – 57. 3. Анциферов А.В. Учет времени взаимодействия элементов при исследовании виброударных систем / А.В. Анциферов, И.А. Царенок. // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – Вип. 51. – С. 126 – 131. 4. Субач А.П. Исследование вынужденных колебаний системы платформа-загрузка при взаимном неупругом соударении масс / А.П. Субач. // Вопросы динамики и прочности. – 1970. – № 20. – С. 63 – 74. 5. Жемочкин Б.Н. Теория упругости / Б.Н. Жемочкин. – М.: Госстройиздат, 1957. – 294 с. 6. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е. Андреев, В.В. Зверевич, В.А. Перов. – М.: Недра, 1965. – 395 с. 7. Динамика удара; [пер. с англ.] / [Дж.А. Зукас, Т. Николас, Х.Ф.Свифт и др.]. – М.: Мир, 1985. – 296 с.

Поступила в редколлегию 17.04.09